

# Nukleare Daten als Grundlage für Forschung und Technologie

M. Rossbach<sup>1</sup>, C. Genreith<sup>1</sup>, B. Scholten<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Institut für Energie und Klimaforschung, Nukleare Entsorgung und Reaktorsicherheit, IEK-6  
Forschungszentrum Jülich GmbH, 52425 Jülich

<sup>2</sup>) Institut für Neurowissenschaften und Medizin, Nuklearchemie, INM-5, Forschungszentrum Jülich GmbH,  
52425 Jülich

# Überblick

- Nukleare Daten – was ist das?
- Anwendungsbereiche für Nukleare Daten
- Wie werden ND generiert,
- Eigene Ergebnisse



## 100

150

# Nukleare Daten

Nuklidmasse, Halbwertszeit, Zerfallskonstante, Wirkungsquerschnitte etc.

Der **Wirkungsquerschnitt** ( $\sigma$ ) ist in der Kern- und Teilchenphysik ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, dass zwischen einer einfallenden Wellenstrahlung oder einem einfallenden Teilchen („Projektil“) und einem anderen Teilchen (Streukörper oder Target) eine bestimmte Wechselwirkung wie z. B. Absorption, Streuung oder eine Reaktion stattfindet.

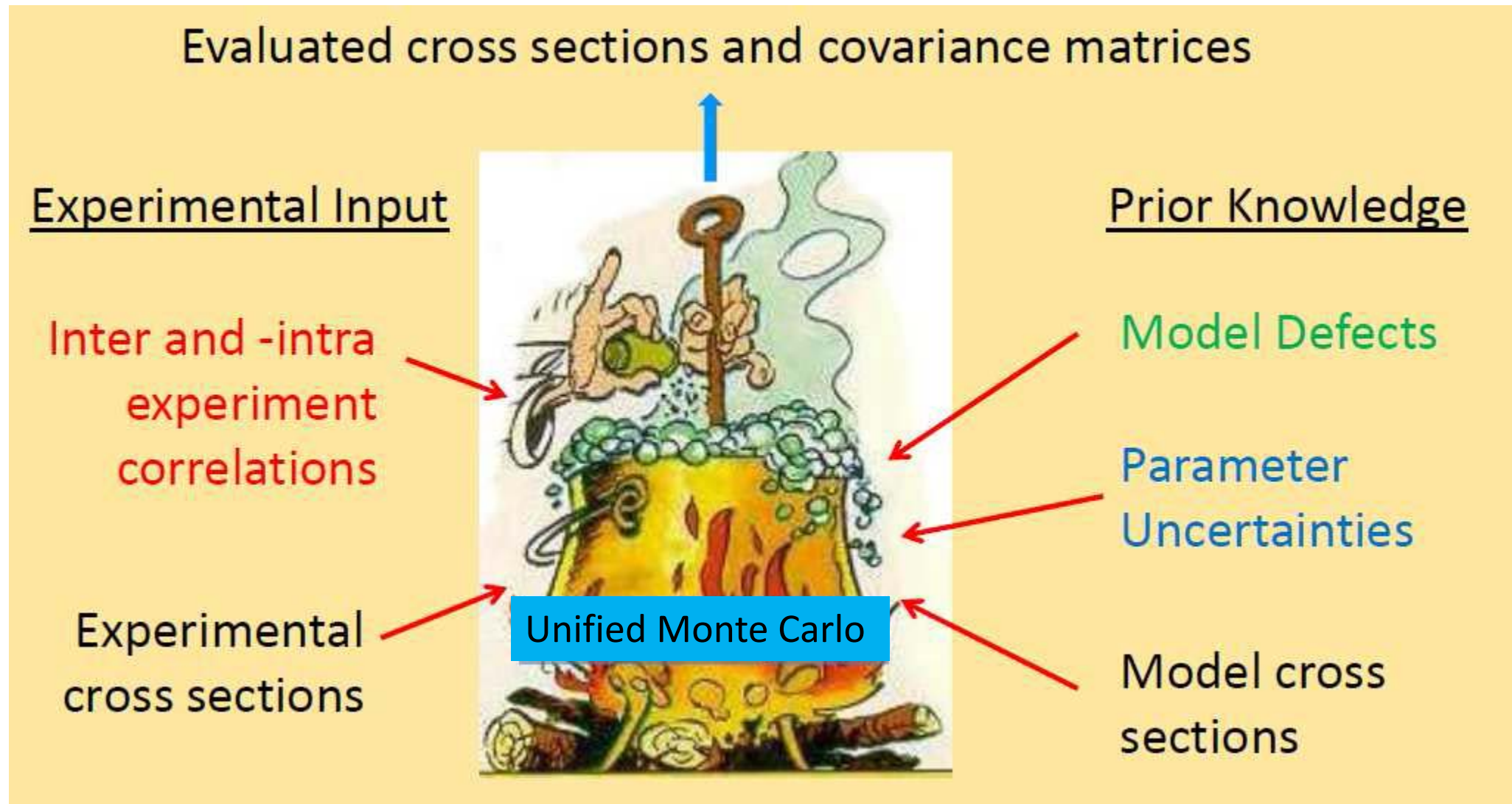
Der Wirkungsquerschnitt hat die Dimension einer Fläche  
in **Barn**  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 10^{-4} \text{ pm}^2 = 100 \text{ fm}^2$ .

Für unsere Betrachtungen sind

- **Absorptionsquerschnitt** für jede Absorption des einfallenden Teilchens
- **Einfangquerschnitt** für eine bestimmte Absorption, nämlich den Neutroneneinfang (die  $(n,\gamma)$ -Kernreaktion), und der
- **Spaltquerschnitt** für die induzierte Kernspaltung wichtig.

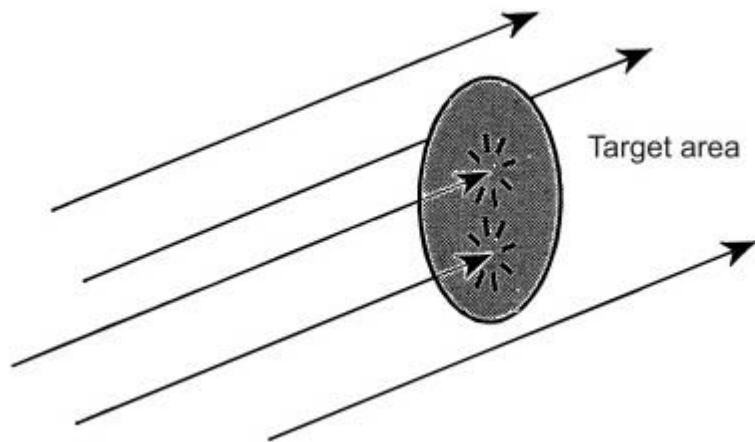


# Nukleare Daten

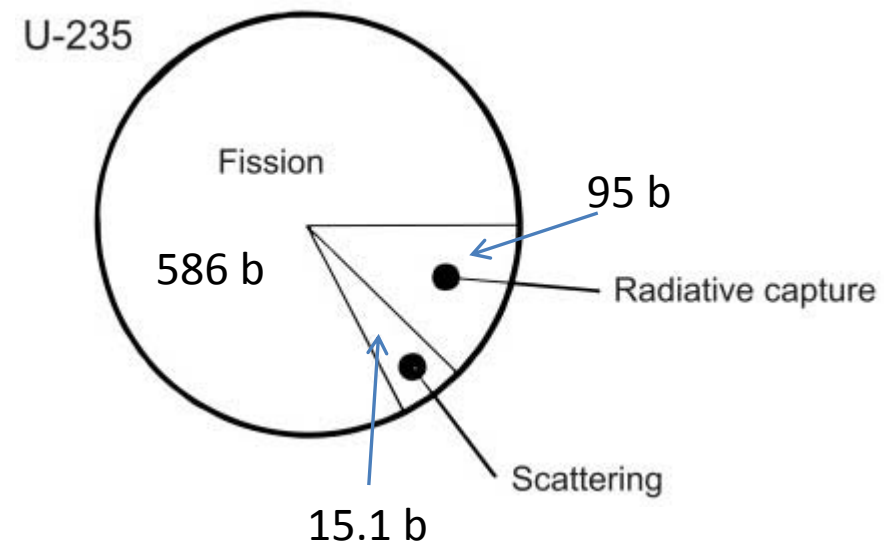


Slightly modified after D. Neudecker, S. Gundacker, H. Leeb *et al.*, ND2010, Jeju Isl., Korea

# Nukleare Daten



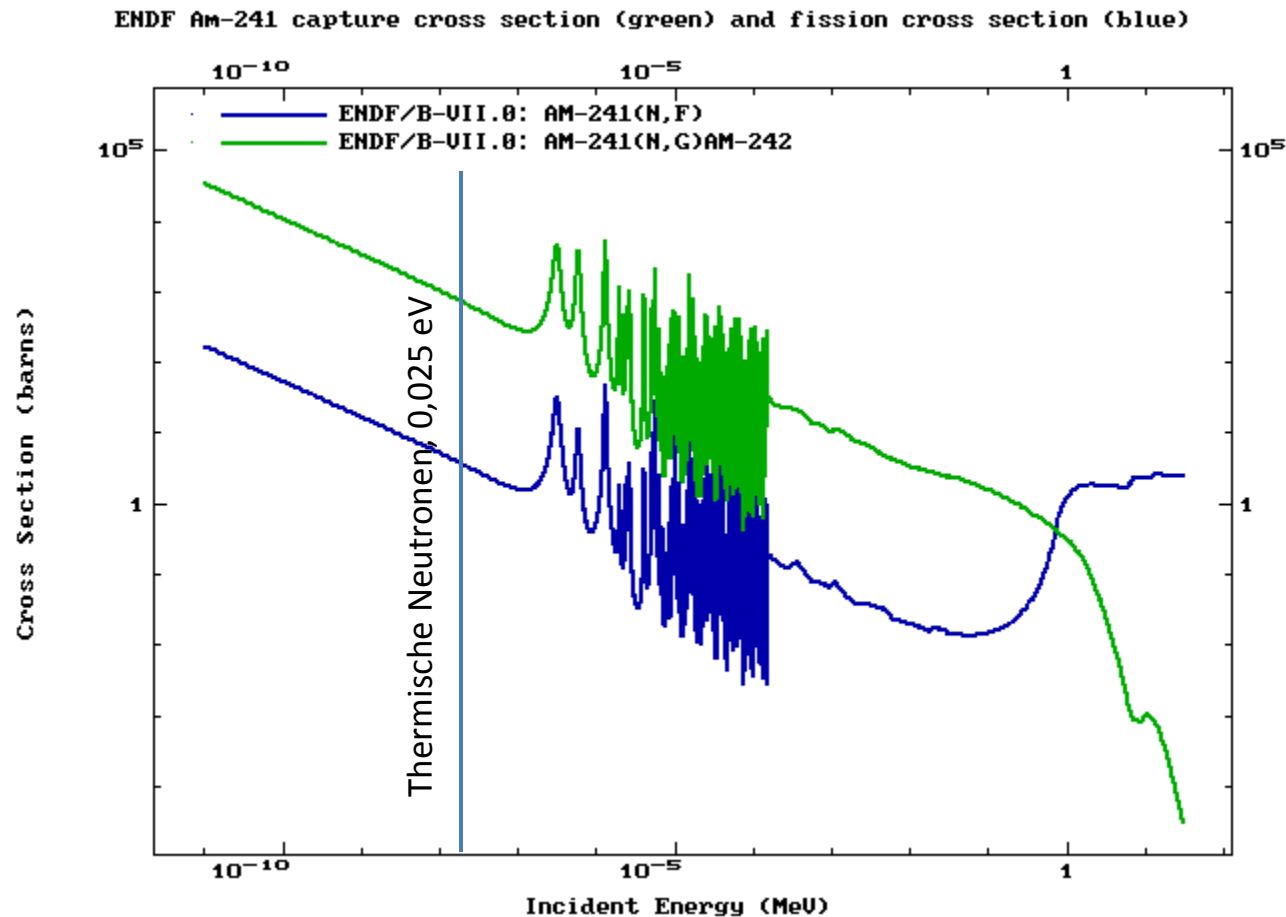
Bildliche Darstellung des Wirkungsquerschnitts



Anteilige Wirkungsquerschnitte unterschiedlicher Reaktionen von  $^{235}\text{U}$  mit thermischen Neutronen.

# Nukleare Daten

Wirkungsquerschnitte sind energieabhängig, d.h. sie müssen in Abhängigkeit von der Neutronenenergie bestimmt werden.



Aus: Evaluated Nuclear Data File (ENDF) <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.jsp>

# Nuclear Data

Comparison of thermal capture cross sections for  $^{241}\text{Am}(n,\gamma)^{242}\text{Am}$  with existing and evaluated data

Thermal $\sigma_{n,\gamma}$	Method	Year	Reference
<b>748 ± 20 b</b>	Activation + spectroscopy	1973	Harbour et al.: Nucl. Sci. Eng. 50, p. 346
<b>624 ± 20 b</b>	Activation + spectroscopy	1976	Kalebin et al.: UDC 621.039.556 Translated from Atomnaya 'Energiya <b>40</b> (4), 303
<b>610 ± 19 b</b>	Activation + spectroscopy	1982	Fröhner et al. Proc. Nucl. Data Sci. Technol. 1982, p.211
<b>585 ± 12 b</b>	Activation + spectroscopy	1984	Mughabghab, S. F.: Neutron cross sections- neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections Part B, A = 61-100. New York N.Y., Academic Press, Orlando, Florida
<b>854 ± 58 b</b>	Activation + spectroscopy	1997	Shinohara et al. Nucl. Sci. Technol. 34, p. 613
<b>602 ± 9 b</b>	Activation + spectroscopy	2001	Maidana et al. Radiochim. Acta 89, p. 419
<b>696 ± 48 b</b>	Activation + spectroscopy	2001	Fioni et al.: Nucl. Phys. A 693, p.546
<b>628 ± 22 b</b>	Activation + spectroscopy	2007	Nakamura et al.: J. Nucl. Sci. Technol. 44, p. 1500
<b>665 ± 33 b</b>	Activation + spectroscopy	2008	Jandel et al.: Phys Rev. C 78, p. 034609
<b>591 ± 35 b</b>	PGAA	2012	T. Belgia et al.: IAEA-NDS document INDC(HUN)-0037
<b>689.2 b</b>	ENDF/B-VII.1	2011	<a href="http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.html">www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.html</a>
<b>689.1 b</b>	JENDL-4.0u	2012	<a href="http://www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/jendl/j33/j33.html">www.ndc.tokai.jaeri.go.jp/jendl/j33/j33.html</a>
<b>651.5 b</b>	JEFF3.1.2	2012	<a href="http://www.nea.fr/html/dbdata/JEFF">www.nea.fr/html/dbdata/JEFF</a>



Vergleich von Wirkungsquerschnitten einiger relevanter Actinide in unterschiedlichen evaluierten Datenkatalogen, ENDF (Brookhaven, USA), JENDL-4.0 (Japan) und JEFF3.3 ( OECD-NEA)

Nuclide	Half life (s)	Half life (years)	ENDF (b)	JENDL-4.0 (b)	JEFF 3.3	our value
<sup>231</sup> Pa	1.03E+12	3,28E+04	200	201,7	226,9	
<sup>233</sup> U	5,02E+12	5,02E+05	45,3	45,26	45,2	
<sup>234</sup> U	7,74E+12	2,46E+05	100,9	100,3	119,2	
<sup>236</sup> U	7,39E+14	2,34E+07	5,1	5,123	13,7	
<sup>237</sup> Np	6,76E+13	2,14E+06	180	178,1	195,8	178,3 ± 8,0
<sup>239</sup> Pu	7,60E+11	2,41E+04	289	271,5	272,4	
<sup>241</sup> Pu	4,51E+08	14,29	360	363,1	363,0	
<sup>242</sup> Pu	1,18E+13	3,73E+05	19	19,88	18,8	19,9 ± 4,0
<sup>241</sup> Am	1,36E+10	432,6	698,2	689,1	651,5	
<sup>243</sup> Am	2,32E+11	7,37E+03	78	79,26	76,7	
<sup>243</sup> Cm	9,18E+08	29,1	130	131,4	130,2	
<sup>244</sup> Cm	5,71E+08	18,11	15	15,24	10,4	
<sup>245</sup> Cm	2,68E+11	8,5E+04	360	347,0	359,1	
<sup>248</sup> Cm	1,07E+13	3,4E+05	2,63	2,87	2,57	

## Beispiele für Anwendungsbereiche

- Nukleosynthese (Aufbau der stabilen Isotope)
- Astro-Physik und Cosmo-Chemie (langlebige Radionuklide zur Bestimmung der Bestrahlungsgeschichte von Meteoriten)
- Geochronologie (Altersbestimmungen,
- Hydrologie (Grundwasseruntersuchungen
- Energieproduktion (Fusions- und Spaltreaktoren, Kritikalität etc.)
- Transmutation (Kernumwandlung durch Teilcheneinfang)
- Strahlenschutz
- Medizintechnik (Diagnose und Therapie)
- Industrie (NDT, Radionuklidbasierte Messverfahren)
- Wissenschaft und Technik

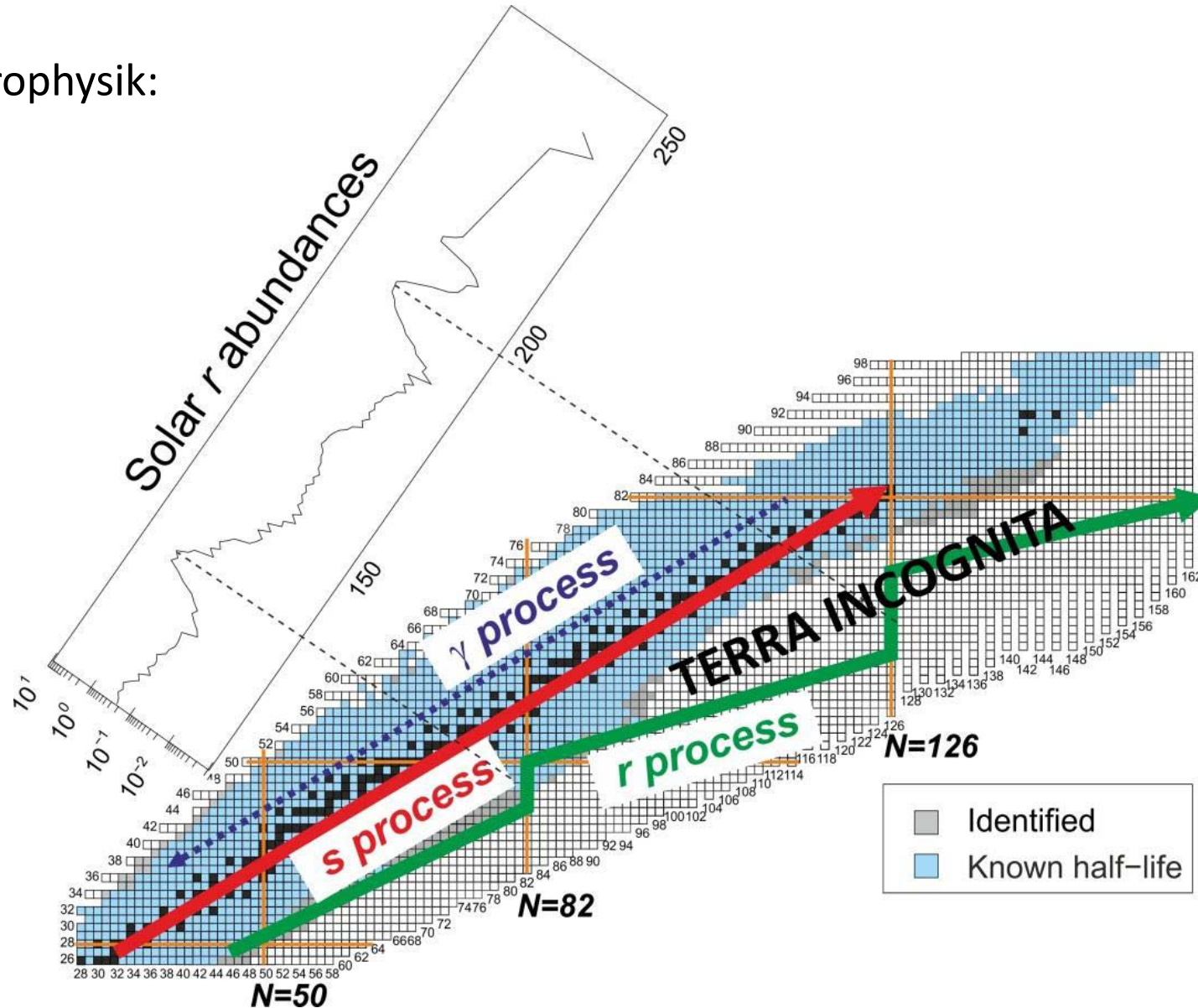
Überall wo Radionuklide zum Einsatz kommen, sind nukleare Daten gefragt, die **richtig** und **präzise** sind.

## Beispiele für Anwendungsbereiche

- z. B.: Radiometrische Bohrlochvermessung (well logging) für die Exploration: ein gepulster Neutronengenerator wird zusammen mit Gammadetektoren in ein Probebohrloch eingeführt. 14 MeV Neutronen werden von der Umgebung teilweise moderiert und eingefangen. Die erzeugte prompte Gammastrahlung wird detektiert und analysiert. Die Genauigkeit der Analyse hängt von der Richtigkeit und Genauigkeit der nuklearen Daten ab.
- z.B.: Radionuklidproduktion für Radiopharmaka: Radionuklide für medizinische Anwendungen können durch Neutronen-, Protonen-, oder Schwerionenbestrahlung hergestellt werden. Genaue Kenntnis der Wirkungsquerschnitte und Zerfallsdaten ist die Voraussetzung für die erfolgreiche Applikation.

# Beispiele für Anwendungsbereiche

z.B.: Astrophysik:

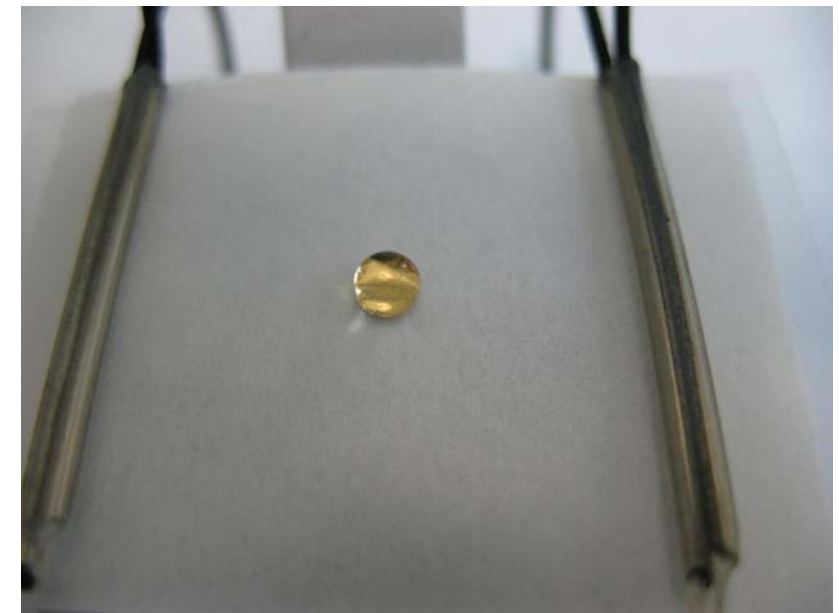
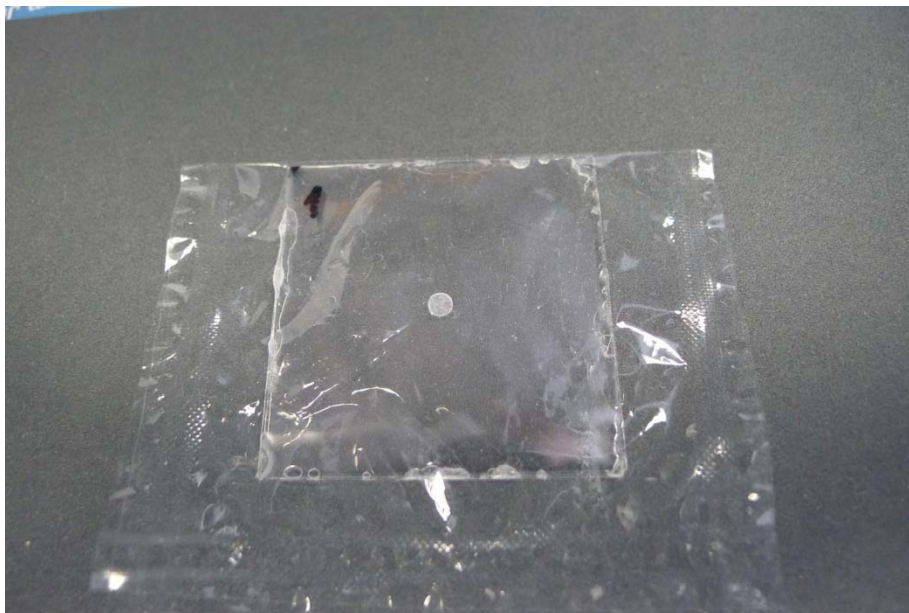
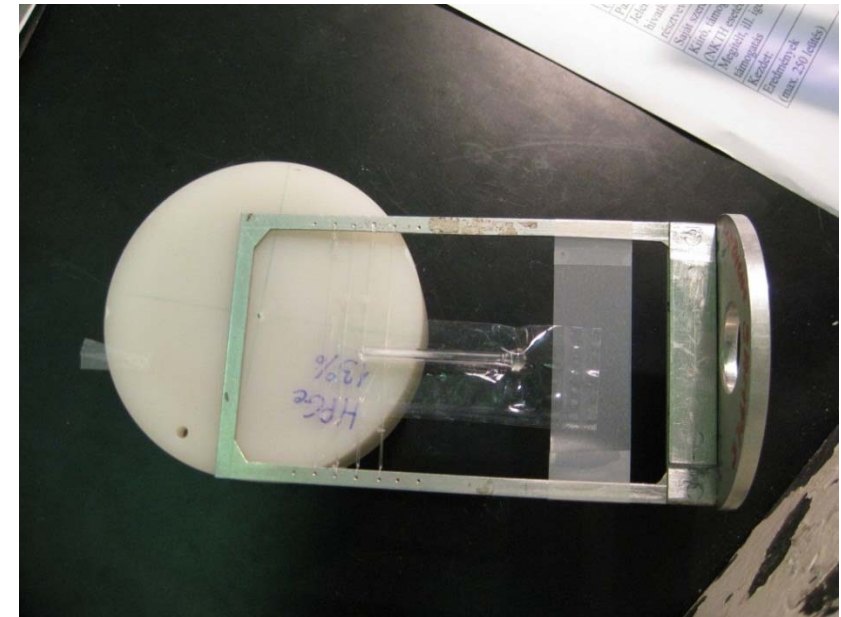


Status of identified isotopes (grey boxes) and isotopes with measured half-lives (blue boxes).

The three processes which are responsible for the nucleosynthesis of heavy elements in stars are shown  
from: IAEA report INDC(NDS)-0599, 2011

# Bisherige Arbeiten und Ergebnisse

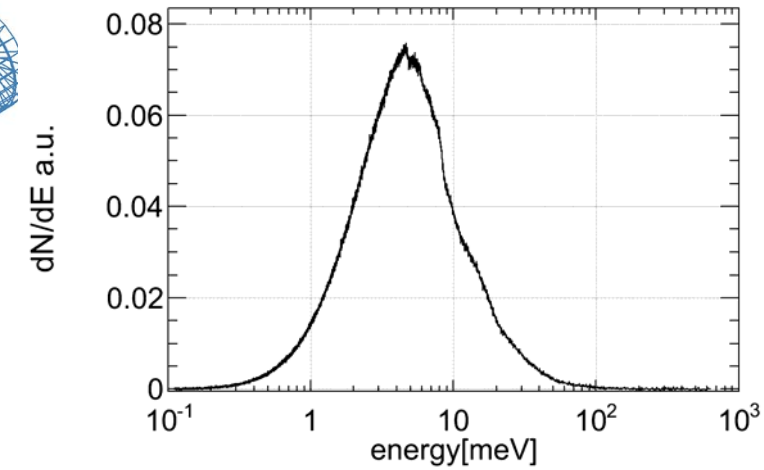
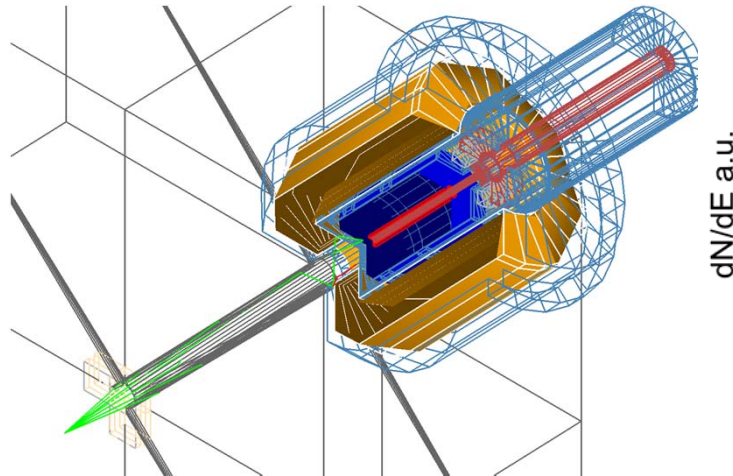
- Herstellung von Bestrahlungsproben in Al und Quarz
- 2 Bestrahlungen in Budapest,  $^{237}\text{NpO}_2$  und  $^{242}\text{PuO}_2$
- 2 Bestrahlungen am FRM II,  $^{237}\text{NpO}_2$  und  $^{242}\text{PuO}_2$  und  $^{241}\text{Am}$ .
- Auswertung der Spektren: Energien, Intensitäten und Wirkungsquerschnitte



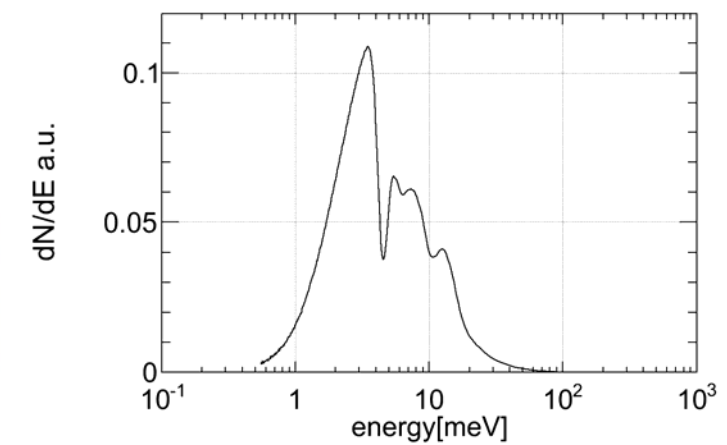
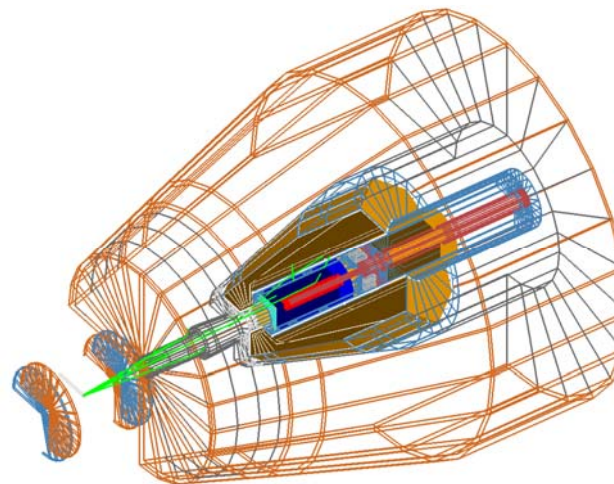


# Measurement Facilities

## FRM II



## Budapest



Experimental setup

GEANT4 simulation

N Energy spectrum

# Bisherige Ergebnisse

## Memorandum of Understanding for a Scientific Cooperation in the Field of Prompt/Delayed Gamma Activation Analysis (MoU for PGAA/NAA)

between

Forschungszentrum Jülich, Germany,  
Institute for Energy and Climate Research,  
Institute for Safety Research and Reactor Technology,  
52425 Jülich, Germany

and

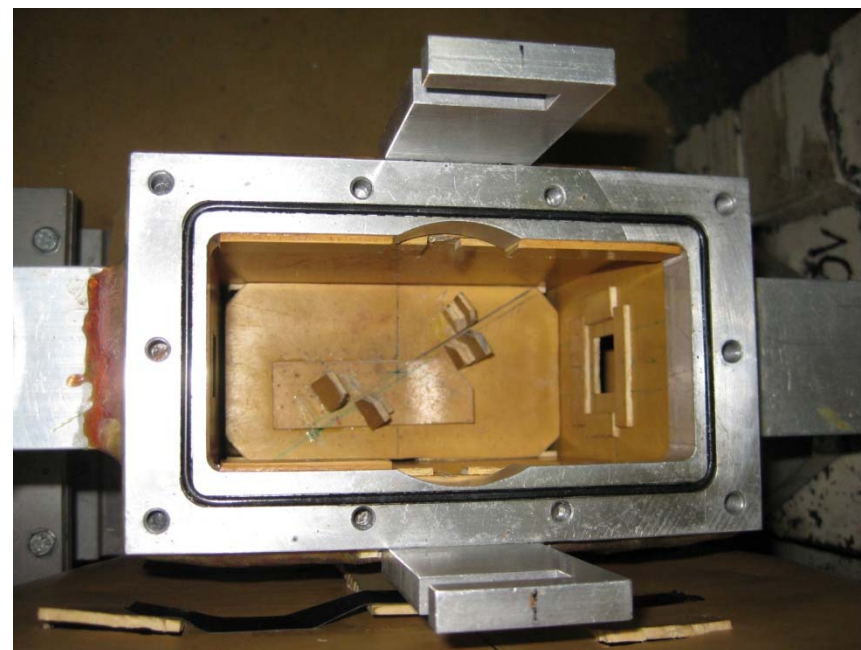
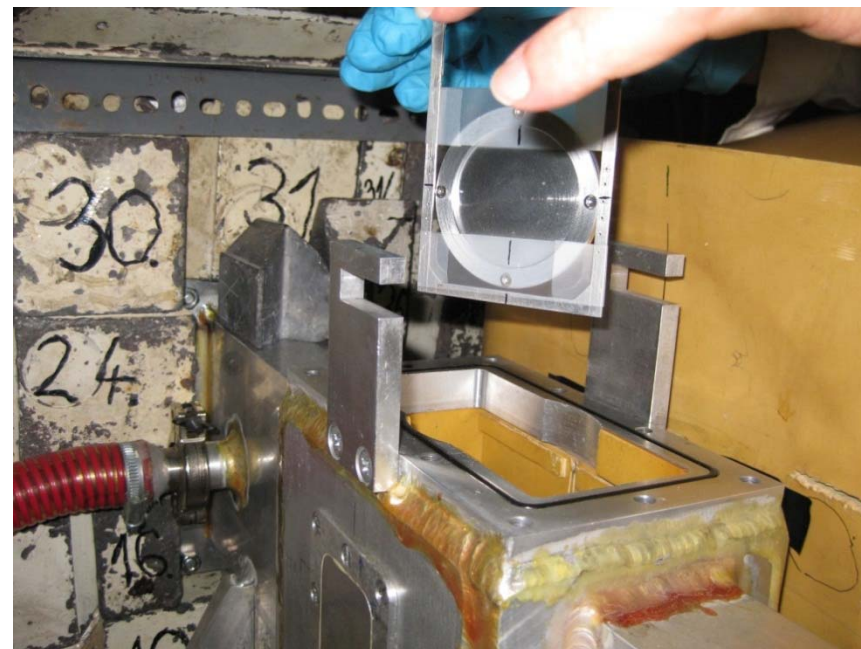
Technische Universität München  
Forschungsneutronenquelle Heinz Maier-Leibnitz,  
85747 Garching, Germany

and

Hungarian Academy of Science,  
Institute of Isotopes at the  
Budapest Nuclear Research Centre  
Budapest, Hungary

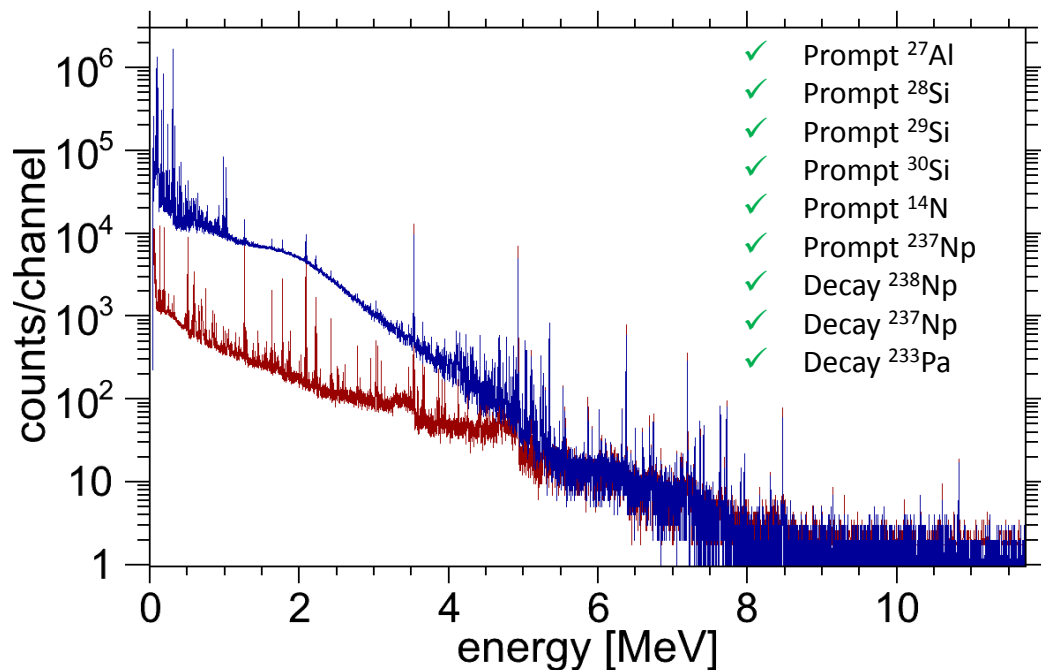
And

Isotopes Project  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Berkeley, CA 94530, USA



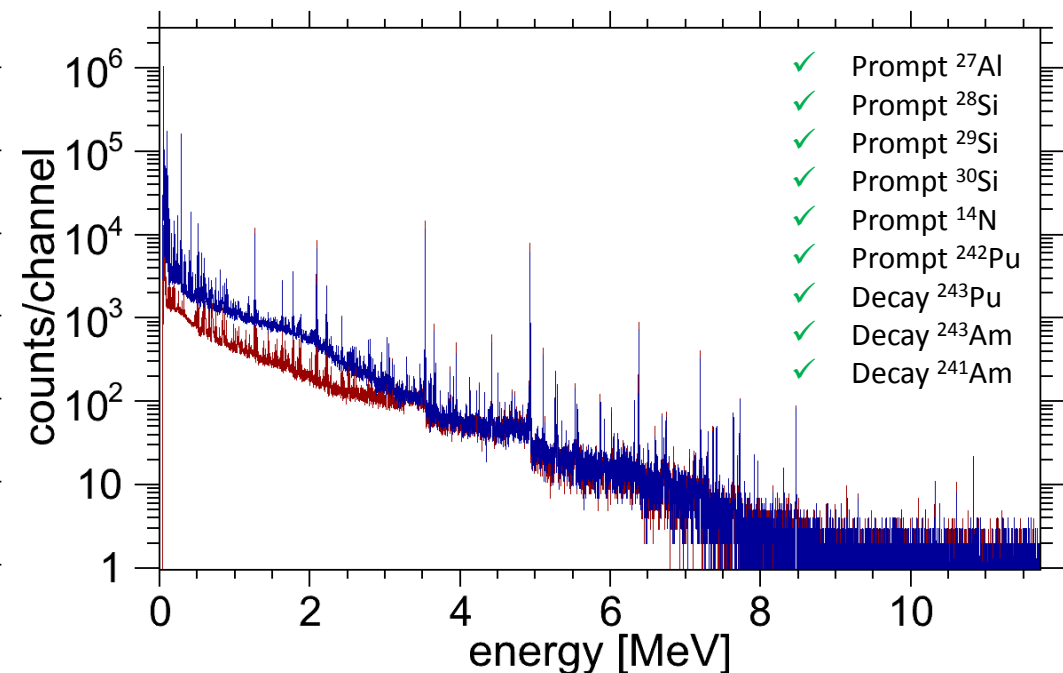
# Bisherige Ergebnisse

$^{237}\text{Np}$  prompt Gamma Spektrum



*Spectrum consists of about 600 peaks in the energy range from 40 keV to 12 MeV*

$^{242}\text{Pu}$  prompt Gamma Spektrum



*Spectrum consists of about 600 peaks in the energy range from 40 keV to 12 MeV*



## Geplante Arbeiten

- Verbesserung der Probenpräparation, Zusammenarbeit mit PTB, Braunschweig
- Untersuchung weiterer Radionuklide, z.B.:  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{233}\text{U}$ , oder  $^{231}\text{Pa}$ , Kooperation mit RCM, LLNL, LBNL
- Ebenso sollen entsorgungsrelevante Nuklide wie  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  oder  $^{235}\text{U}$  untersucht werden
- Validierung der Ergebnisse durch Bestrahlungen am FRM II ( $10^{10} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
- Aufbau und Test einer PGAA mit schnellen Neutronen am FRM II, (n,2n) Reaktionen
- Weiterführung der Simulationen zur Optimierung eines Messverfahrens



## PGAA mit schnellen Neutronen

- Am FRM II existiert eine Bestrahlungsmöglichkeit mit Spaltneutronen (2-3 MeV,  $4.9 \text{ E}+6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 30 x 30 cm)
- RCM unterstützt den Aufbau einer PGAA Einrichtung durch FZJ
- Durch Bestrahlung mit schnellen Neutronen werden (n,n'), (n,2n), (n, $\alpha$ ) und (n,p) Reaktionen zugänglich.
- In Bezug auf die Entwicklung eines NG basierten Messverfahrens ist dieses ein wichtiger Entwicklungsschritt.

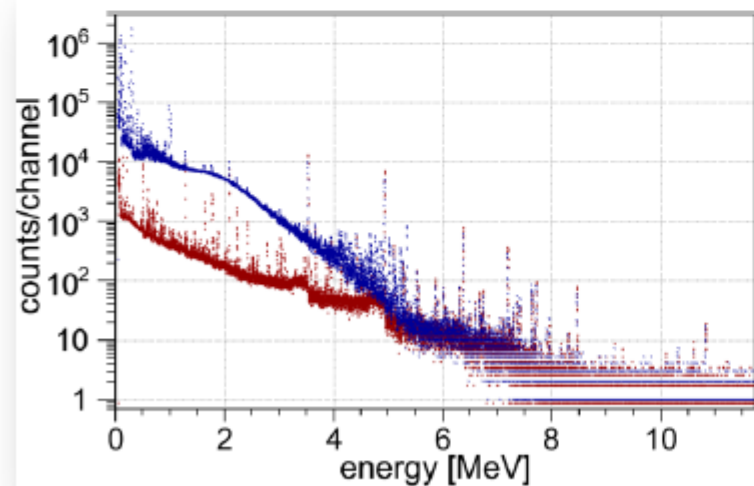




# The Poster

## Interested?

## See you at the poster!



### Neutron Capture Cross Sections of $^{237}\text{Np}$ and $^{242}\text{Pu}$ from Prompt Gamma Radiation

C. Gerwilt<sup>1</sup> and M. Rudolph

Institute of Energy and Climate Research – Nuclear Waste Management and Reactor Safety, Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany  
<sup>1</sup>c.gerwilt@fz-juelich.de



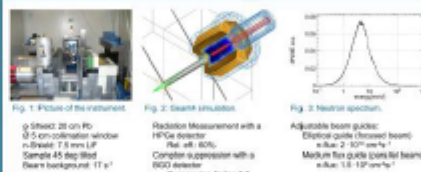
#### Introduction and Method

##### Motivation

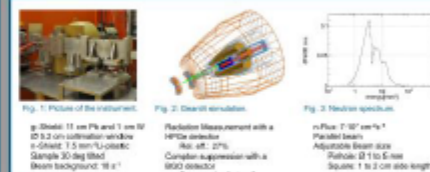
Accurate and precise reaction cross sections are essential to obtain reliable results from calculations performed to design reactors or transmutation facilities, for nuclear waste characterization and nuclear safeguards applications. Data tabulated in libraries are often inconsistent, even between evaluated data catalogs, associated with large uncertainties or based on one experiment only. To investigate this situation, experiments were performed to study the thermal neutron capture data of several actinides using prompt gamma activation analysis.



#### Garching

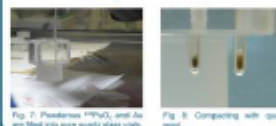


#### Budapest

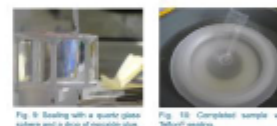


#### Sample Preparation

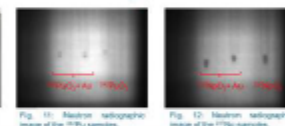
##### Filling and Compacting



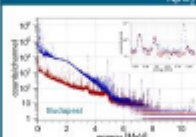
##### Sealing



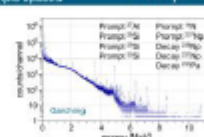
##### Neutron Radiographic Characterization



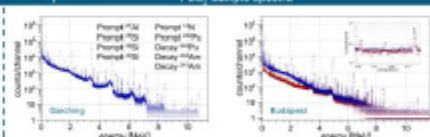
#### $^{237}\text{Np}_2\text{O}_3$ sample spectra



#### Prompt Gamma Spectra



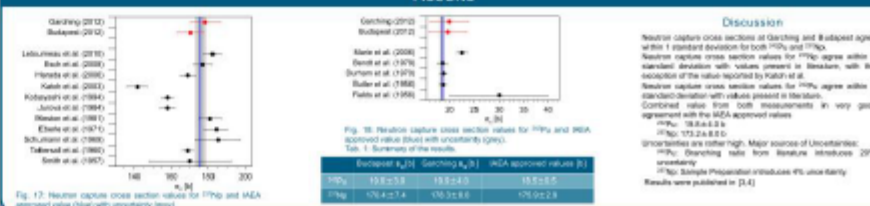
#### $^{242}\text{Pu}$ sample spectra



#### Analysis



#### Results



[1] A. Lehoucq et al. (2010) Appl. Radiat. and Isotopes 69: 432-438.  
 [2] P. Marie et al. (2005) Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A 555:547-555.

[3] C. Gerwilt et al. (2012) J. of Radioanal. and Nucl. Chem. in press.  
 [4] C. Gerwilt et al. (2012) Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. A 644:443-448.